

Article, Published Version

Heins, Evelyn; Grabe, Jürgen; Hamann, Thorben
Numerische Simulation einer
Bodenverbesserungsmaßnahme infolge
Rütteldruckverdichtung

BAWMitteilungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102522>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Heins, Evelyn; Grabe, Jürgen; Hamann, Thorben (2015): Numerische Simulation einer Bodenverbesserungsmaßnahme infolge Rütteldruckverdichtung. In: BAWMitteilungen 98. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 59-68.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Numerische Simulation einer Bodenverbesserungsmaßnahme infolge Rütteldruckverdichtung

Numerical Simulation of Ground Improvement Using Deep Vibration Compaction

Evelyn Heins, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe, Technische Universität Hamburg-Harburg; Dipl.-Ing. Thorben Hamann, COWI A/S – Office Hamburg

Die Rütteldruckverdichtung wird als Bodenverbesserungsmaßnahme für nichtbindige Böden eingesetzt. Im Zuge einer solchen Maßnahme wird der Boden verdichtet, die Grundbruchsicherheit erhöht, Setzungen reduziert und die Verflüssigungsneigung verringert. Der Tiefenrüttler besteht aus einer oder mehreren exzentrisch angeordneten, rotierenden Massen. Die Masse rotiert während des Verdichtungsvorgangs um die vertikale Achse des Rüttlers, sodass eine oszillierende Rüttlerbewegung entsteht. Um den Verdichtungsprozess zu optimieren, können numerische Simulationen durchgeführt werden. Hierbei ist eine Betrachtung des Einflusses der dynamischen Rüttlerkraft auf den Verdichtungsprozess möglich. Für die numerische Modellierung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Aus diesem Grund wird die Rütteldruckverdichtung mit Hilfe der klassischen Finite-Elemente-Methode (FEM) sowie der gekoppelten Euler-Lagrange-Methode (CEL) simuliert. Hierbei wird sowohl ein drainiertes als auch ein teildrainiertes Bodenverhalten betrachtet.

Deep vibration compaction is used as a ground improvement method for non-cohesive soils. When carrying out this procedure, the soil is compacted, the bearing capacity of the soil is increased, settlements are reduced and the tendency towards liquefaction of the soil is reduced. The compactor consists of eccentrically arranged, rotating masses. These masses rotate around the vertical axis of the compactor, giving rise to an oscillating compactor movement. Numerical simulations can be conducted to optimize the compaction process. An investigation of the influence of the dynamic compactor force on the compaction process is possible. Several different modelling techniques exist for the numerical simulation under consideration. For this reason, a deep vibration compaction is modelled with the conventional finite element method (FEM) as well

as with the coupled Eulerian-Lagrangian method (CEL). The behaviour of both drained and partially drained soil is considered.

1 Einleitung *Introduction*

Mit Hilfe von Baugrundverbesserungsmaßnahmen kann das Risiko des Bodenversagens verringert werden. Mit Hilfe der Rütteldruckverdichtung werden tieferliegende Bodenschichten aus granularem Material verdichtet, Setzungen reduziert, die Grundbruchsicherheit erhöht sowie die Verflüssigungsgefahr bei dynamischer Anregung des Bodens verringert.

Numerische Simulationen können eingesetzt werden, um das Verfahren der Rütteldruckverdichtung zu optimieren oder um maßgebende Einflussparameter auf die Verdichtungswirkung des Verfahrens zu bestimmen. Um dies ausführen zu können, ist eine Modellierungsmethode erforderlich, die das Bodenverhalten während der Rütteldruckverdichtung wiedergeben kann. Darüber hinaus sind die auftretenden Verformungen rechenstabil abzubilden. Aus diesem Grund wird der Vorgang der Rütteldruckverdichtung mit Hilfe der gekoppelten Euler-Lagrange-Methode (engl. *Coupled Eulerian-Lagrangian-Method* (CEL)) und mit der klassischen Finite-Elemente-Methode (FEM) modelliert. Darüber hinaus werden ein drainiertes und ein teildrainiertes Bodenverhalten betrachtet.

2 Rütteldruckverdichtung *Deep vibration compaction*

Für die Tiefenverdichtung mittels Rütteldruckverfahren wird ein Tiefenrüttler eingesetzt. Dieser setzt sich zusammen aus einem Stahlzylinder und einer Haltestange. Der Stahlzylinder (Rüttler) hat eine Länge von 2,0 m bis 4,0 m und einen Durchmesser von 0,30 m bis 0,50 m. Massen, die innerhalb des Rüttlers angeordnet sind, rotieren um die Vertikalachse des Tiefenrüttlers, wodurch eine oszillierende Bewegung des Rüttlers erzeugt wird. Der Rüttler und die Haltestange sind gelenkig miteinander verbunden. Die Haltestange hat denselben Durchmesser wie der Rüttler und wird durch einen Kran gehalten (Witt, 2009).

Ein typischer Rüttler weist eine Schwingfrequenz von 30 Hz bis 60 Hz auf, wobei eine maximale Auslenkung des Rüttlerfußes von 0,003 m bis 0,021 m auftritt. Diese Angaben sind äquivalent zu einer Horizontalkraft des Rüttlers von 150 kN bis 700 kN (Fellin, 2000; Witt, 2009).

Zu Beginn des Rütteldruckverfahrens wird der Tiefenrüttler eingebracht. Mit Hilfe des Eigengewichts des Gerätes oder durch Bohrflüssigkeit wird der Rüttler auf die gewünschte Tiefe abgesenkt. Während der Verdichtung wird der Rüttler stufenweise gezogen. Mit jeder Schrittdauer von etwa 30 s bis 60 s kann der Rüttler um 0,30 m bis 1,0 m gezogen werden.

Die vom Rüttler ausgehenden Scherwellen führen zur Verdichtung im Boden. Die entstehenden Hohlräume verfüllen sich durch den umgebenden Boden. Der an der Geländeoberkante entstehende Setzungstrichter wird durch Bodenmaterial verfüllt. Auf diese Weise wird die Lagerungsdichte des Bodens in einem Radius von etwa 0,6 m bis 1,75 m um den Rüttler erhöht. Das beste Ergebnis kann erzielt werden, wenn die Verdichtungsmaßnahme in endlichen Abständen wiederholt wird (Fellin, 2000; Witt, 2009).

3 Numerische Modellierung *Numerical modelling*

3.1 Methode *Method*

Bei der Rütteldruckverdichtung treten im Boden große Verformungen auf. Deshalb ist es erforderlich die Bodenverbesserungsmaßnahme mit einem numerischen Verfahren abzubilden, welches große Verformungen rechenstabil verarbeiten kann. Hierfür ist die CEL-Methode geeignet. In dieser Methode werden die Vorteile einer Lagrange- und einer Euler-Formulierung kombiniert. Diese beiden Formulierungsmethoden bilden die Grundlage der FEM und sind in Bild 1 dargestellt.

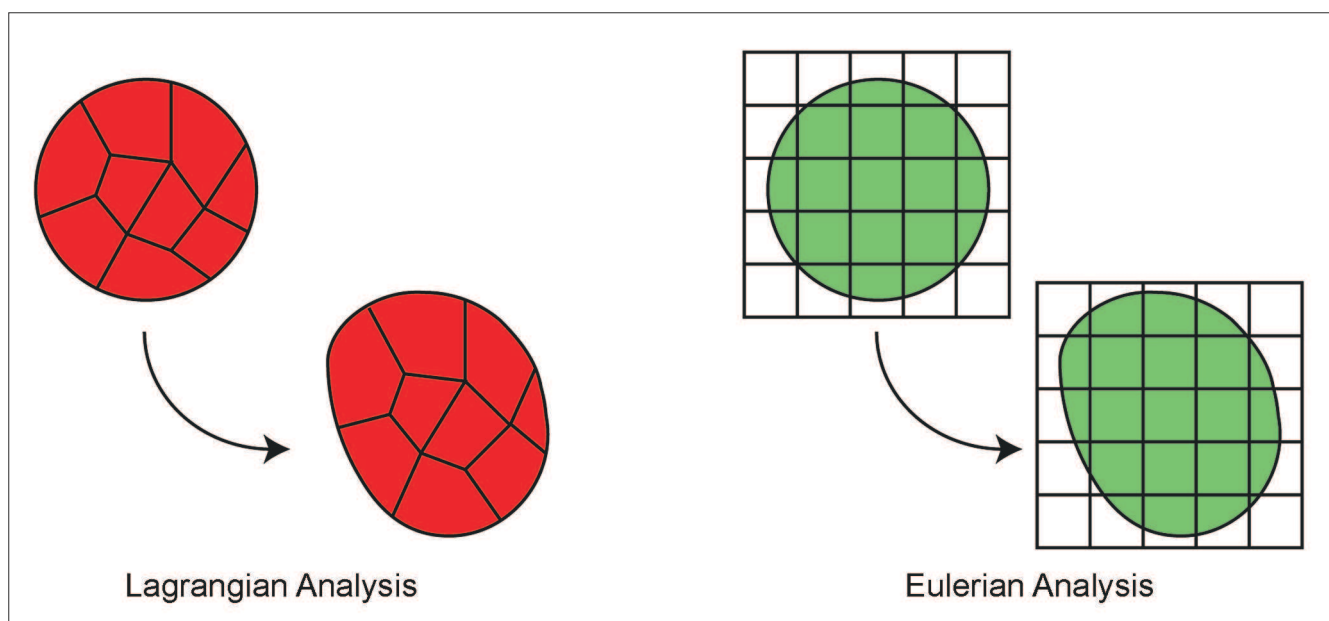


Bild 1: Verformung eines Kontinuums in einer Lagrange- (links) und einer Euler-Analyse (rechts) (Qiu, 2012)
Figure 1: Deformation of a continuum in a Lagrangian (left) and a Eulerian analysis (right) (Qiu, 2012)

Der Lagrange-Formulierung liegt eine Kontinuumsbeschreibung zugrunde, die von der Zeit und von Materialkoordinaten abhängig ist. Dies bedeutet für die numerische Simulation, dass sich das FE-Netz mit dem Material verformen wird und ein Materialpunkt immer dem gleichen Netz-Knoten zugeordnet ist. Mit Hilfe der Lagrange-Formulierung können Oberflächen sehr genau nachvollzogen werden, aber es können große Netzverzerrungen und damit Recheninstabilitäten auftreten. Diese Formulierung wird in der klassischen FEM verwendet (Qiu, 2012).

Die Euler-Formulierung geht von einem ortsfesten FE-Netz aus, durch das sich das Euler-Material hindurch bewegen kann. Eine Kontinuumsbewegung wird entsprechend in Abhängigkeit von der Zeit und von Ortskoordinaten beschrieben. Mit Hilfe dieser Formulierung ist es möglich, große Verformungen weitestgehend stabil zu beschreiben (Qiu, 2012).

In der CEL-Methode wird die Bewegung eines nach Lagrange formulierten Objektes innerhalb eines Euler-Gebietes beschrieben (vgl. Bild 2). Das Lagrange-Objekt kann sich solange widerstandslos in der Euler-Region bewegen, bis es auf Euler-Material trifft. Zu diesem Zeitpunkt wird die allgemeine Kontaktformulierung aktiviert, welche eine Überlappung von Euler- und

Lagrange-Material verhindert. Die Materialverteilung innerhalb des Euler-Netzes wird über den Eulervolumenanteil (engl.: *Eulerian Volume Fraction* (EVF)) beschrieben. Jedes Euler-Element kann beliebige Werte zwischen $0 \leq \text{EVF} \leq 1$ annehmen. $\text{EVF} = 0$ beschreibt ein materialleeres und damit ein mit Luft gefülltes Element. Über $\text{EVF} = 1$ wird ein vollständig mit Material gefülltes Element definiert. Die Berechnung der Kräfte und der Verschiebungen des Lagrange-Objektes und des Euler-Materials erfolgt unter Ansatz der durch das jeweils andere Objekt ausgeübten Einwirkung (Qiu, 2012).

Die CEL-Methode wurde bereits des öfteren erfolgreich zur Berechnung von geotechnischen Problemen mit großen Verformungen eingesetzt, z. B. in Qiu et al. (2009) und Pucker und Grabe (2012).

3.2 Modellierung der Rütteldruckverdichtung

Modelling of the deep vibration compaction method

Die CEL-Methode ist in der Lage große Verformungen, wie sie beispielsweise bei der Rütteldruckverdichtung im Boden auftreten, abzubilden. Bei der klassischen FEM kann es hingegen zu großen Netzverzerrungen kommen. Der Vorteil der FEM liegt in der deutlich kürzeren Rechenzeit der Modelle, wodurch die Variation von mehreren Parametern und Randbedingungen effizient möglich ist. Für ein FE-Modell der Rütteldruckverdichtung sind gegenüber dem CEL-Modell Vereinfachungen zu treffen und es ist zu zeigen, dass beide Modelle vergleichbare Ergebnisse liefern. Aus diesem Grund wird im Folgenden erläutert, wie die Rütteldruckverdichtung in einem CEL- und einem FE-Modell umgesetzt werden kann.

3.2.1 CEL-Modell

CEL model

Basierend auf der CEL-Methode wird das in Bild 3 dargestellte dreidimensionale Modell für die Abbildung der Rütteldruckverdichtung genutzt.

Der Bodenkörper wird als Zylinder mit einem Radius von $r = 15,0$ m und einer Höhe von $h = 25,0$ m modelliert. Der für die Materialausbreitung benötigte materialleere Bereich hat eine Höhe von $h = 1,0$ m. Die Materialbewe-

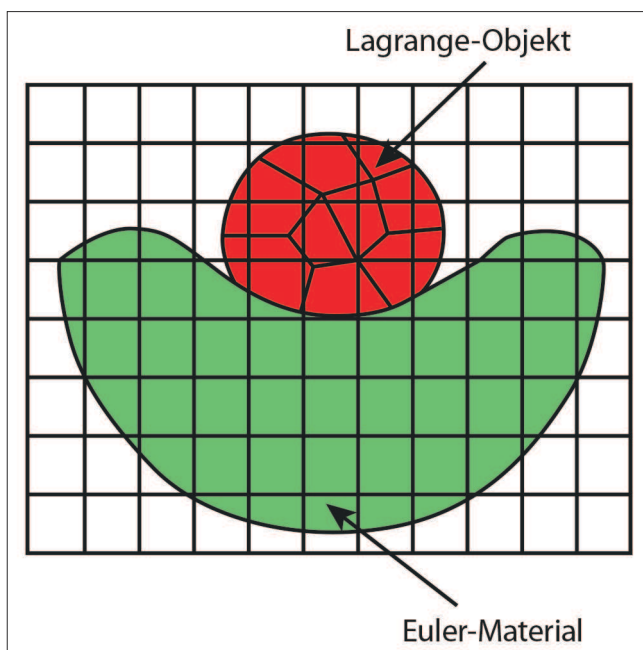


Bild 2: Verformung des Lagrange-Objektes und des Euler-Materials in der CEL-Methode (Qiu, 2012)

Figure 2: Deformation of a Lagrangian object and a Eulerian material for the CEL method (Qiu, 2012)

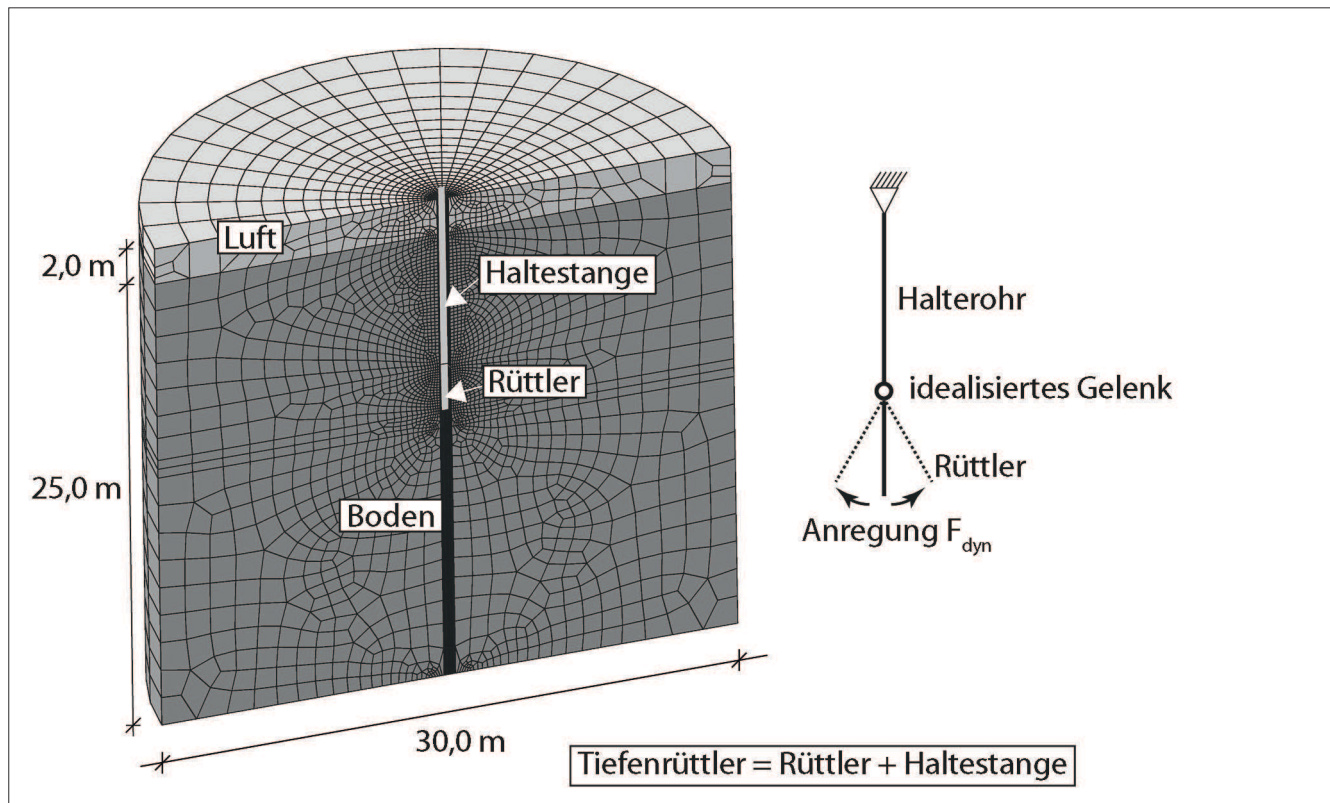


Bild 3: Vertikaler Schnitt durch das CEL-Modell

Figure 3: Vertical section through the CEL model

gung normal zu den Modellgrenzen aus dem Modell heraus wird durch Randbedingungen verhindert. Die Diskretisierung des Bodenkörpers erfolgt mit achtknotigen Euler-Elementen mit reduzierter Integration. Für den Tiefenrüttler wird angenommen, dass er zu Beginn des Verdichtungsprozesses $d = 10,0$ m in den Boden vorinstalliert ist. Dies wird mit Hilfe der wished-in-place-Methode abgebildet. Der Rüttler hat eine Länge von $L = 2,50$ m und einen Durchmesser von $D = 0,3$ m. Der Rüttler ist mit der Haltestange, die ebenfalls einen Durchmesser von $D = 0,3$ m hat, gelenkig verbunden. Die Bewegung der Haltestange wird an ihrem oberen Ende in vertikaler und horizontaler Richtung verhindert. Für den gesamten Tiefenrüttler wird ein linear elastisches Materialverhalten mit einem Elastizitätsmodul von $E = 210 \cdot 10^6$ kN/m² und einer Querdehnzahl von $\nu = 0,3$ angenommen. Für die Vernetzung des Tiefenrüttlers werden Lagrange-Elemente, in diesem Fall achtknotige Hexaeder-Elemente mit linearem Ansatz für die Verschiebung und reduzierter Integration, gewählt.

Für den Kontakt wird eine allgemeine *penalty* Kontaktformulierung verwendet. Hierbei wird die Reibung zwi-

schen dem Rüttler und dem Boden als vernachlässigbar angenommen und entsprechend ein reibungsfreier Kontakt für das Modell angesetzt.

Über die angeführte Beschreibung hinausgehende Details zum Modellaufbau können Henke et al. (2012) entnommen werden.

3.2.2 FEM-Modell

FE model

Im FE-Modell (vgl. Bild 4) wird der Bodenausschnitt ebenfalls als dreidimensionaler Zylinder modelliert. Der Radius des Zylinders wird zu $r = 15,0$ m und die Höhe zu $h = 26,0$ m gesetzt. Der Tiefenrüttler wird mittels der wished-in-place-Methode $d = 8,0$ m in den Boden voreingestellt. Die Rüttlerlänge wird mit $L = 2,5$ m angenommen. Der Rüttler wird als Starrkörper-Röhre mit einem Durchmesser von $D = 0,3$ m modelliert und in alle Bewegungsrichtungen fixiert. Um die Rüttlerbewegung abbilden zu können, wird der Boden in acht Segmente unterteilt und auf die Segmente im Bereich des Rüttlers eine rotierende Kraft angesetzt.

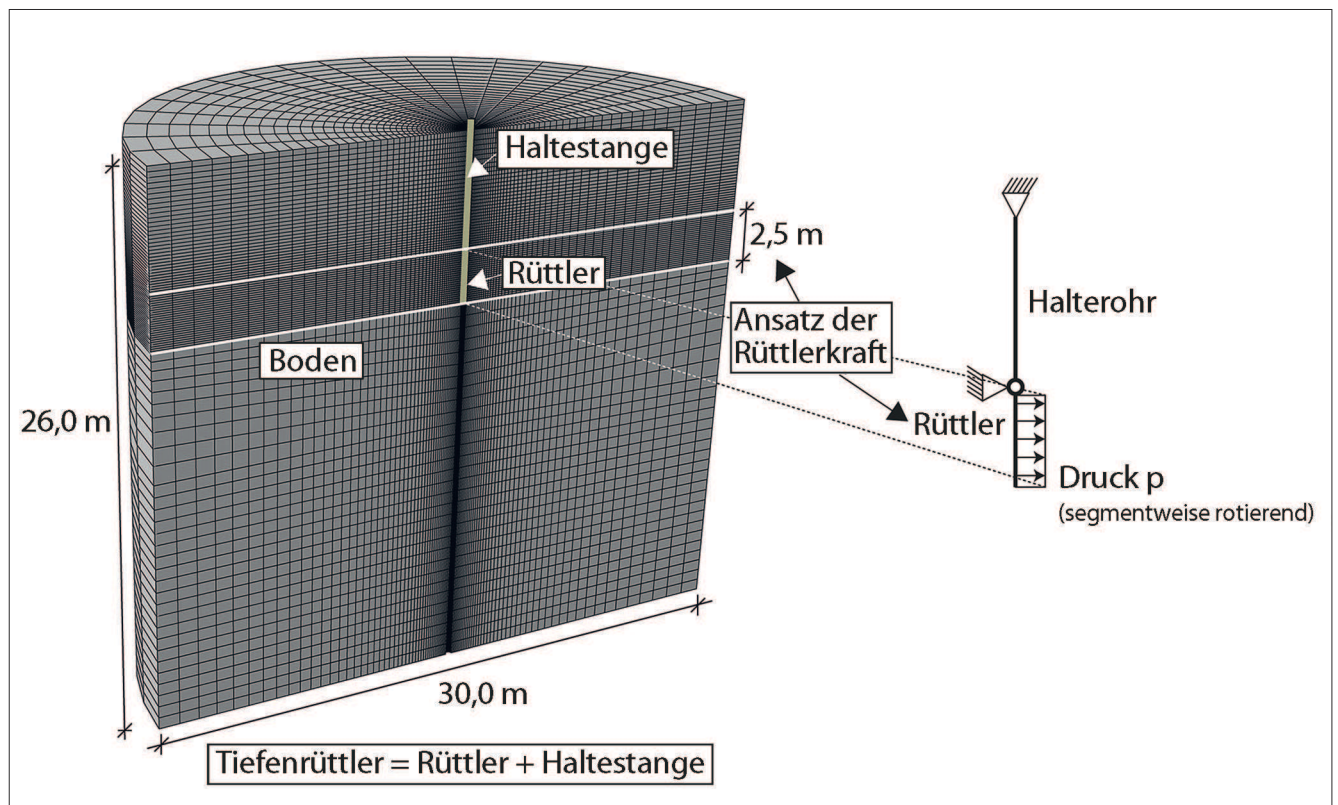


Bild 4: Vertikaler Schnitt durch das FE-Modell

Figure 4: Vertical section through the FE model

Die Diskretisierung erfolgt sowohl für den Bodenausschnitt als auch für den Rüttler mit Lagrange-Elementen. Das FE-Netz besteht aus acht knotigen Hexaeder-Elementen mit reduzierter Integration und einem linearen Ansatz für die Verschiebung.

Der Kontakt zwischen dem Boden und dem Rüttler wird über eine kinematische Kontaktformulierung als reibungslos vorgegeben.

3.3 Hypoplastisches Stoffgesetz

Hypoplastic constitutive model

Der Boden wird für diese numerische Simulation als trockener Sand angenommen. Um das Bodenverhalten während der Verdichtung realitätsnah abbilden zu können, wird das hochwertige hypoplastische Stoffgesetz nach von Wolffersdorff (1996) mit der Erweiterung der intergranularen Dehnungen nach Niemunis und Herle (1997) verwendet. Dieses Stoffgesetz ermöglicht die Abbildung von typischen Bodeneigenschaften von Bedeutung für Verdichtungsprozesse im Boden, beispielsweise Dilatanz, Kontraktanz, Pyknotropie, Barotropie sowie

unterschiedliche Be- und Entlastungssteifigkeiten. In Mahutka (2008) und in Qiu (2012) wird gezeigt, dass das oben genannte hypoplastische Stoffgesetz in der Lage ist, das nichtlineare, anelastische Verhalten granularer Materialien numerisch abzubilden.

| Parameter | Einheit | Mai-Liao-Sand |
|-------------|---------|---------------|
| φ_c | [°] | 31,5 |
| h_s | [MPa] | 32,0 |
| n | [-] | 0,324 |
| e_{d0} | [-] | 0,57 |
| e_{c0} | [-] | 1,04 |
| e_{i0} | [-] | 1,20 |
| α | [-] | 0,4 |
| β | [-] | 1,0 |
| m_T | [-] | 2,0 |
| m_R | [-] | 5,0 |
| R | [-] | 0,0001 |
| β_R | [-] | 0,5 |
| χ | [-] | 6,0 |

Tabelle 1: Hypoplastische Stoffparameter für Mai-Liao-Sand
Table 1: Hypoplastic material parameters for Mai-Liao sand

Die erforderlichen Stoffparameter für den implementierten Mai-Liao-Sand (Cudmani, 2001) sind in Tabelle 1 aufgeführt. Es wird eine lockere Lagerung für den Boden mit $I_D = 0,2$ für die numerische Simulation angesetzt. Dies entspricht einer Porenzahl von $e_0 = 0,925$.

3.4 Teildrainiertes Bodenverhalten

Partially drained soil behaviour

Während des Verdichtungsvorgangs kann das Porenwasser im Boden eine wesentliche Rolle spielen. Aus diesem Grund ist es ratsam, den Boden in der numerischen Modellierung als Zweiphasengemisch, welches aus festen Bodenkörnern und einem Porenfluid besteht, abzubilden. Ein Ansatz für eine vollständig gekoppelte Verformungs-Sicker-Analyse für gesättigte Böden basierend auf einem expliziten Zeitintegrationsschema wird in Hamann und Grabe (2013) vorgestellt. Dieser Ansatz stützt sich auf eine *up*-Formulierung, worin \mathbf{u} das Verschiebungsfeld der Feststoffphase und p das Porenwasserdruckfeld darstellen. Die Bewegungsgleichung wird für die Mischung aus Festkörper und Fluidphase gelöst. Das Verhalten des Korngerüsts wird über das zuvor beschriebene hypoplastische Stoffgesetz nach von Wolffersdorff (1996) mit der Erweiterung der intergranularen Dehnungen nach Niemunis und Herle (1997) beschrieben. Weitere Details zu diesem Ansatz sind Hamann und Grabe (2013) zu entnehmen.

Für den modellierten Sand wird ein Sättigungsgrad $S = 99\%$ und eine Durchlässigkeit $k_f = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ angesetzt. Die weiteren erforderlichen Stoffparameter sind Tabelle 2 zu entnehmen.

| Parameter | Einheit | Mai-Liao-Sand |
|-----------|---------------------|-------------------|
| S | [%] | 99 |
| k_f | [m/s] | $1 \cdot 10^{-4}$ |
| K_w | [kPa] | $2,02 \cdot 10^4$ |
| K_s | [kPa] | $3,7 \cdot 10^7$ |
| ρ_w | [t/m ³] | 1,0 |
| ρ_s | [t/m ³] | 2,65 |

Tabelle 2: Weitere Stoffparameter für Mai-Liao-Sand
Table 2: Further material parameters for Mai-Liao sand

3.5 Lastgeschichte und Variationen

Load history and variations

Als Anfangszustand der Simulation wird ein Erdruhezustand mit einem Erdruhedruckbeiwert von $K_0 = 1 - \sin(\varphi)$ angesetzt. Im Anschluss hieran wird der Prozess der Rütteldruckverdichtung über eine Dauer von 3,0 s simuliert.

In der CEL-Simulation wird die Rüttlerbewegung kraftgesteuert modelliert, wobei am Rüttlerfuß eine Einzelkraft $H = 300,0 \text{ kN}$ mit zeitlich veränderlicher Richtung wirkt. Die Drehung des Rüttlers ist mit einer Frequenz $f = 30,0 \text{ Hz}$ um die vertikale Tiefenrüttlerachse definiert. Um den Einfluss der horizontalen Rüttlerkraft auf den umliegenden Boden untersuchen zu können, werden bei gleichbleibender Frequenz zusätzlich die Kräfte $H = 150,0 \text{ kN}$, $H = 500,0 \text{ kN}$ und $H = 700,0 \text{ kN}$ berücksichtigt.

Im Gegensatz hierzu wird in der FE-Analyse die Kraft auf den Boden nicht über einen sich bewegenden Rüttler, sondern über eine Kraft aufgebracht, die mit einer Frequenz $f = 30,0 \text{ Hz}$ im Bereich des Rüttlers auf die einzelnen Bodensegmente wirkt. Die Kraft wird über einen über die Bodensegmente rotierenden Druck von $p = 75 \text{ kN/m}^2$ aufgebracht.

Der Boden in der FE-Analyse wird mit dem unter Abschnitt 3.3 beschriebenen hypoplastischen Stoffmodell abgebildet. In der CEL-Modellierung finden für eine dynamische Kraft von $H = 300,0 \text{ kN}$ sowohl das erwähnte hypoplastische Stoffgesetz als auch das teildrainierte Bodenverhalten Anwendung.

4 Modellierungsergebnisse

Results of the numerical simulation

4.1 Einfluss der dynamischen Rüttlerkraft

Influence of the dynamic force

Da die Rüttlerfrequenz in allen CEL-Simulationen gleich angesetzt wurde, kann mit Hilfe der unterschiedlichen Simulationen und der Kraftvariation der Einfluss der dynamischen Kraft während des Verdichtungsprozesses auf den Boden untersucht werden.

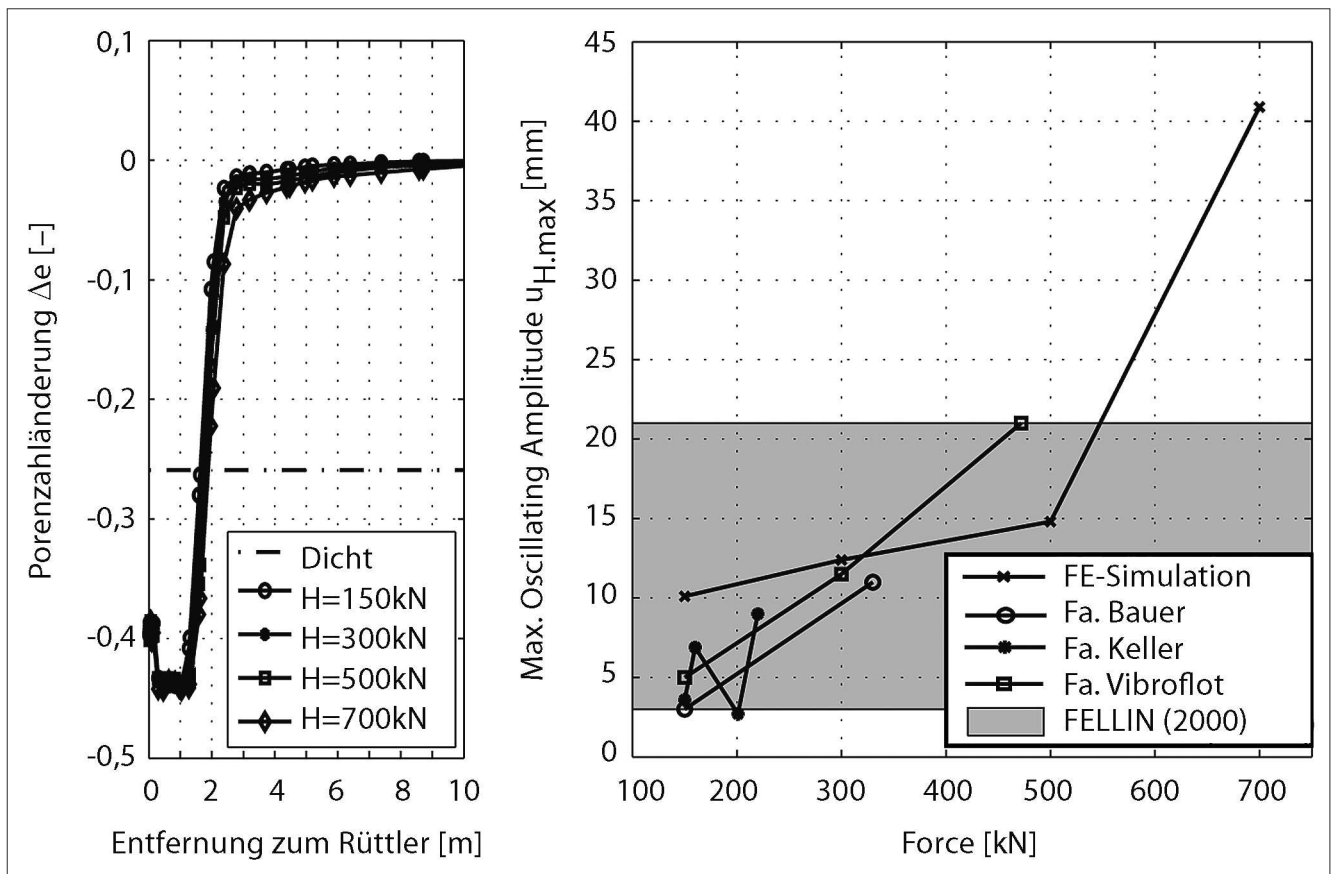


Bild 5: Porenzahlverteilung entlang eines horizontalen Pfads 8,75 m unterhalb Geländeoberkante (links) und Beziehung zwischen Rüttlerkraft und Oszillationsamplitude (rechts)

Figure 5: Distribution of void ratio along a horizontal path 8.75 m below ground level (left) and relationship between vibrator force and oscillating amplitude (right)

Wie ein Vergleich mit Literaturwerten zeigt, liefern die numerische Simulationen plausible Ergebnisse. Hierfür kann die Beziehung zwischen der horizontalen Rüttlerkraft und der daraus berechneten Auslenkung des Rüttlerfußes (oszillierende Amplitude) betrachtet werden. In Bild 5 (rechts) ist für diese Kraft-Auslenkungs-Beziehung ein Vergleich zwischen der durchgeführten numerischen Simulation und Literaturwerten aus Fellin (2000) abgebildet. Die durchgeführten Modellierungen ergeben für die angesetzten horizontalen Kräfte im Bereich $150,0 \text{ kN} \leq H \leq 700,0 \text{ kN}$ oszillierende Amplituden von $10,1 \text{ mm} \leq u \leq 40,9 \text{ mm}$. Dieses Ergebnis zeigt gute Übereinstimmungen mit den Literaturwerten.

Als Auswertung der Kraftvariation kann die Porenzahlverteilung über einen horizontalen Pfad in einer Tiefe von 8,75 m unter Geländeoberkante betrachtet werden. Hieraus ist der Einflussbereich der Rütteldruckverdichtungsmaßnahme abzuleiten. Aus Bild 5 (links) wird ersichtlich, dass die Rüttlerkraft nur einen geringen Einfluss auf die Einflussfläche hat. Eine Rüttlerkraft von

$H = 700,0 \text{ kN}$ führt zu einer Einflussfläche, in der die relative Lagerungsdichte mindestens $I_D = 0,75$ beträgt, mit einem Radius von $r = 1,88 \text{ m}$. Im Vergleich hierzu ist für eine Kraft von $H = 150,0 \text{ kN}$, entsprechend einer Verringerung um ungefähr 80 %, mit $r = 1,63 \text{ m}$ ein etwa 10 % kleinerer Radius anzusetzen.

Somit wurde beispielhaft gezeigt, dass die CEL-Methode in der Lage ist die Rütteldruckverdichtung abzubilden. Weiterführende Ergebnisse und Variationsberechnungen können Henke et al. (2012) und Grabe et al. (2015) entnommen werden.

4.2 Vergleich zwischen CEL und FEM

Comparison between CEL and FEM

In der FE-Analyse kann, da die Bewegung des Tiefenrüttlers nicht abgebildet wird, sondern nur ein Kraftansatz erfolgt, die dreidimensionale horizontale Verschiebung des Rüttlers nicht abgebildet werden. In

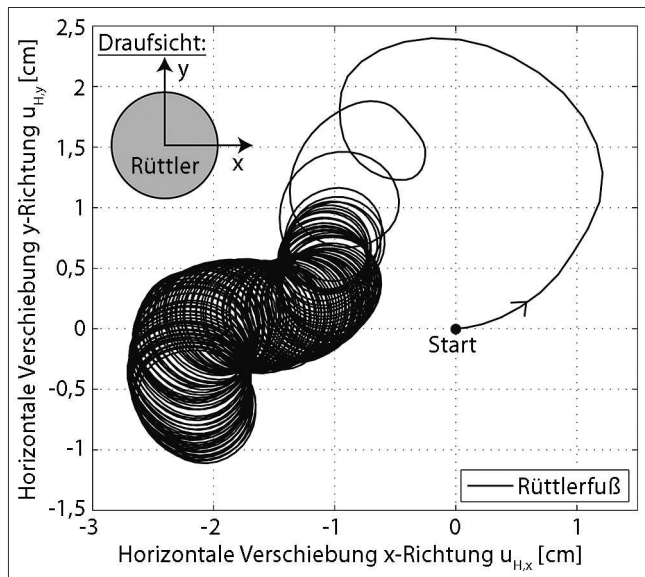


Bild 6: Horizontale Rüttlerbewegung in einer CEL-Simulation bei $H = 150,0$ kN und $f = 30,0$ Hz (Henke et al., 2012)

Figure 6: Horizontal vibrator movement calculated with a CEL simulation with $H = 150.0$ kN und $f = 30.0$ Hz (Henke et al., 2012)

Henke et al. (2012) wurde für eine dynamische Kraft $H = 150,0$ kN und eine Frequenz $f = 30,0$ Hz mit der in Bild 6 dargestellten Abbildung gezeigt, dass in der CEL-Simulation eine horizontale Bewegung des Rüttlers und damit eine unsymmetrische Verdichtung abgebildet werden kann. Dies ist möglich, da sich die oszillierende Amplitude des Rüttlerfußes unter Berücksichtigung der berechneten Zustandsveränderungen im Boden frei einstellen kann.

Die klassische FE-Analyse kann dennoch eingesetzt werden, um längere Simulationszeiten zu ermöglichen und Variationsrechnungen durchzuführen und hierbei wesentliche Einflüsse zu ermitteln. Anhand eines Vergleichs der Porenzahlverteilung wird deutlich (vgl. Bild 7), dass die Ergebnisse der FE-Simulationen denen der CEL-Simulationen sehr ähnlich sind. In beiden numerischen Simulationen bildet sich der verdichtete Bereich in etwa kugelförmig um den Rüttler aus und ein trichterförmiger verdichteter Bereich reicht bis an die Geländeoberkante heran. Die Porenzahl angrenzend an den Rüttler liegt nach einer Simulationszeit von 1,5 s in beiden Analysen etwa bei $e = 0,5$.

4.3 Vergleich zwischen drainierten und teildrainierten Bedingungen

Comparison between drained and partially drained conditions

Infolge dynamischer Anregungen kann es zur Verflüssigung und damit zum Tragfähigkeitsverlust des Bodens kommen. Um dies zu verhindern, kann eine Bodenverbesserungsmaßnahme durch Bodenverdichtung stattfinden. Für den Verdichtungsprozess ist der Einfluss des Porenwassers ebenfalls von Bedeutung. Dieser Effekt wird durch den Fließwiderstand des Wassers hervorgerufen. Bild 8 zeigt den Vergleich zwischen einer drainierten und einer teildrainierten CEL-Simulation. Dargestellt ist die Porenzahlverteilung nach einer

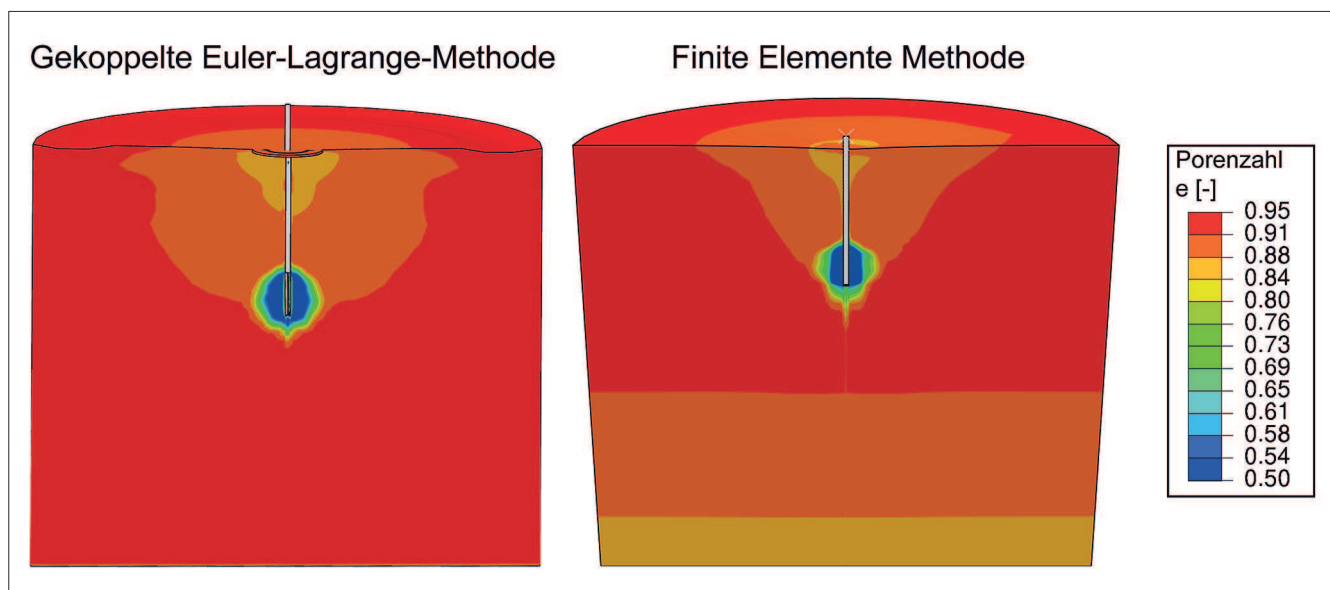


Bild 7: Vergleich der Porenzahlverteilung einer FE- und einer CEL-Simulation nach einer Simulationszeit von 1,5 s

Figure 7: Comparison between the void ratio distribution a FE and a CEL simulation after a simulation time of 1.5 s

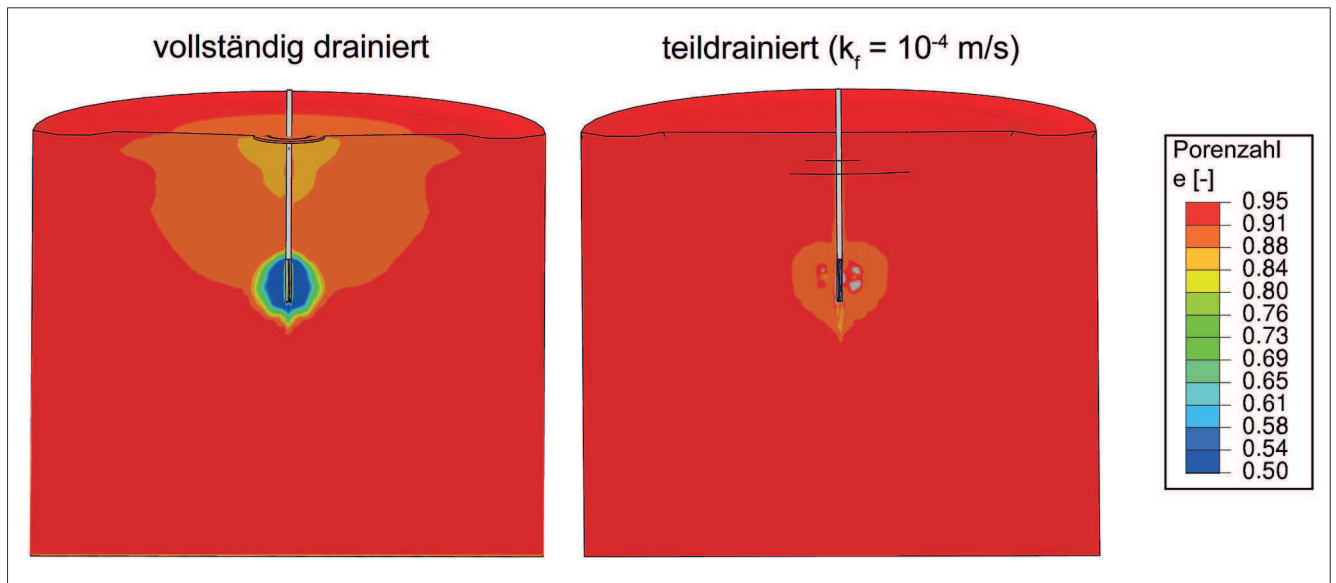


Bild 8: Vergleich der Porenzahlverteilung einer vollständig drainierten und einer teildrainierten Analyse
 Figure 8: Comparison between the void ratio distribution of a completely drained and a partially drained analysis

Simulationszeit von 1,5 s bei einer Vibrationsfrequenz von $f = 30$ Hz und einer Rüttlerkraft von $H = 300,0$ kN. Die Verdichtungswirkung bildet sich in beiden Analysen in etwa kreisförmig um den Rüttler aus. In der teildrainierten Simulation ist die Verdichtungswirkung jedoch deutlich geringer als in der drainierten Analyse.

Eine Erklärung für diese geringere Verdichtungswirkung kann durch die entstehenden Porenwasserüberdrücke gegeben werden. In Bild 9 sind die Porenwasserüberdrücke und die zugehörigen effektiven Radialspannungen nach 1,5 s Simulationszeit der teildrainierten Analyse gezeigt.

5 Zusammenfassung und Ausblick Conclusion and outlook

Die Rütteldruckverdichtung kann als Bodenverbesserungsmaßnahme eingesetzt werden. Durch die Verdichtung des Bodens können Setzungen reduziert und die Tragfähigkeit erhöht werden. Bei dynamischer Anregung, beispielsweise durch Erdbeben, kann auch das Risiko einer Bodenverflüssigung reduziert werden. Um die Auswirkung spezieller Randbedingungen zu ermitteln, zur Bestimmung von maßgebenden Einflussparametern und zur Optimierung der Rütteldruckverdichtung können numerische Simulationen eingesetzt

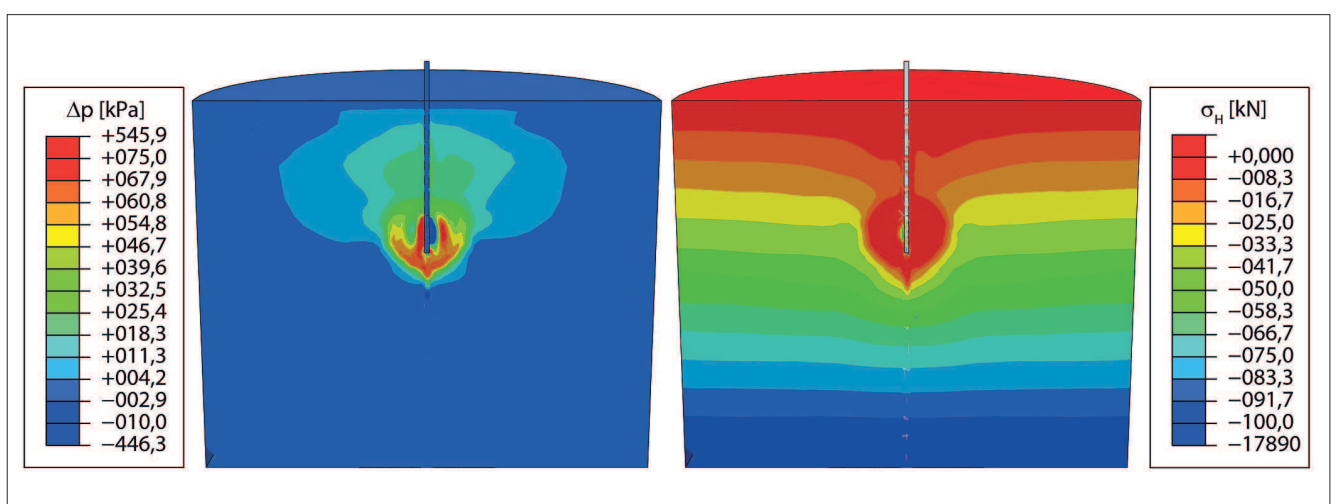


Bild 9: Porenwasserüberdrücke und effektive Radialspannungen der teildrainierten Analyse
 Figure 9: Excess pore pressure and effective radial stresses of the partially drained analysis

werden. Die Ergebnisse dieses Beitrags zeigen, dass hierzu sowohl die klassische FEM als auch die CEL-Methode eingesetzt werden können.

Für den Vergleich der beiden Modellierungsmethoden wurde der Baugrund als drainierter Sand modelliert. Die Ergebnisse beider Simulationen sind vergleichbar, jedoch ist die FEM nicht in der Lage, die Rüttlerbewegung als solche abzubilden. Die deutlich reduzierte Rechenzeit der FEM-Modelle ermöglicht es dennoch, die grundlegenden Effekte während der Rütteldruckverdichtung abzubilden und dabei Variationen und lange Simulationsdauern anzusetzen.

Das Porenwasser hat grundsätzlich einen deutlichen Einfluss auf das Bodenverhalten. Aus diesem Grund wurde für eine CEL-Modellierung sowohl drainiertes als auch teildrainiertes Materialverhalten untersucht. Es zeigt sich, dass die Verdichtungswirkung zwischen beiden Ansätzen deutlich unterschiedlich ist und sich die Verdichtungswirkung bei teildrainierten Bedingungen im Boden sichtbar langsamer und damit gegebenenfalls weniger ausbildet. Dies ist auf den Fließwiderstand des Porenwassers zurückzuführen. Für numerische Modellierungen der Rütteldruckverdichtung im Boden ist es wichtig, sobald Porenwasser vorhanden ist, den Boden als Zweiphasengemisch abzubilden.

6 Literatur References

- Cudmani, R.O. (2001): Statische, alternierende und dynamische Penetration in nichtbindigen Böden. Dissertation, Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 152.
- Grabe J., Heins E. und Hamann T. (2015): Simulation of ground improvement using deep vibration compaction. In: Proceedings of 6th International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions 2015 in Chennai (India), pp. 281–284.
- Hamann, T. und Grabe, J. (2013) Simple dynamic approach for the numerical modeling of soil as a 2-phase-material. *Geotechnik*, Vol:36, No.:3., pp 279–299.
- Henke, S. und Hamann, T. und Grabe, J. (2012) Numerische Untersuchungen zur Bodenverdichtung mittels Rütteldruckverfahren. In: Proceedings des 2. Symposiums Baugrundverbesserung in der Geotechnik 2012, Wien, pp 209–228.
- Fellin, W. (2000) Rütteldruckverdichtung als plastodynamisches Problem. Institute of Geotechnics and Tunneling, University of Innsbruck, *Advances in Geotechnical Engineering and Tunneling*, Heft 2.
- Mahutka, K.-P. (2008) Zur Verdichtung von rolligen Böden infolge dynamischer Pfahleinbringung und durch Oberflächenrüttler. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 15.
- Niemunis, A. and Herle, I. (1997) Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol:2, pp 279–299.
- Pucker, T. and Grabe, J. (2012) Numerical simulation of the installation process of full displacement piles. *Computer and Geotechnics*, 45, pp 93–106.
- Qiu, G. and Henke, S. and Grabe, J. (2009) Application of coupled eulerian lagrangian method to geomechanical problems involving large deformation. In: Proceedings of SIMULIA Customer Conference 2009, London, pp 420–435.
- Qiu, G. (2012) Coupled Eulerian Lagrangian Simulations of Selected Soil-Structure Interaction Problems. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 24.
- Von Wolffersdorff, P. (1996) A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol:1, pp 279–299.
- Witt, K.J. (2009) *Grundbau-Taschenbuch*, Teil 2: Geotechnische Verfahren, Ernst & Sohn, Berlin, 2009.